

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt.: „**Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Lucjan Śniezek
Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Grzelak

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji była Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej nr 44/TDN IM2024 z dnia 26.07.2024 roku, o czym poinformował Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski pismem z dnia 30 lipca 2024 r. Do pisma dołączono wydrukowany egzemplarz rozprawy mgr inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt. „Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM”.

2. Zakres i układ rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa została wydana w formie drukowanego dwustronnie opracowania formatu A4 liczącego 247 stron w tym cztery strony streszczeń, po dwie w języku polskim i angielskim, dwie strony spisu treści, dwie strony wykazu skrótów, trzynaście stron wykazu literatury (208 pozycji i 12 norm). Praca zawiera 135 rysunków i 29 tabel. Treść pracy zawarto w dziesięciu rozdziałach w tym „Podsumowanie i wnioski końcowe”. Ponadto praca zawiera krótki trzystronicowy „Wstęp” i „Streszczenie w języku polskim i angielskim” oraz wykaz bibliografii „Literatura”.

We wstępie Autor przedstawił na podstawie światowych analiz rynkowych udział poszczególnych rodzajów elementów w globalnej produkcji przy użyciu technologii przyrostowych oraz perspektywy ich rozwoju w ujęciu wartościowym. W tym kontekście Autor uzasadnił rozważania zawarte w rozprawie doktorskiej dotyczące przydatności technologii SLM (ang. Selective Laser Melting) w produkcji elementów mechanicznych układów napędowych.

Doktorant dokonał gruntownej analizy stanu literatury, który zamieścił w trzech rozdziałach:

1. Techniki przyrostowe w zastosowaniach inżynierskich.
2. Rozwój technik wytwarzania kół zębatach.
3. Badania wytrzymałości zmęczeniowej kół zębatach.

Podsumowanie i wnioski z analizy stanu problemu stanowią obszerny rozdział czwarty.

Cel i zakres pracy Autor przedstawił w rozdziale piątym. Jako **cel naukowy** Doktorant określił „**zbadanie trwałości zmęczeniowej oraz przebiegu rozwoju uszkodzeń powierzchni zębów kół zębatych wytwarzanych przyrostowo ze stali 21NiCrMo2 z uwzględnieniem wpływu obróbki cieplno-chemicznej**”. Zaś cel użytkowy to „**ocena możliwości zastosowań techniki SLM do wytwarzania kół zębatych walcowych o zębach prostych ze stali 21NiCrMo2**”. W tym rozdziale przedstawiony jest również zakres badań umożliwiające zrealizowanie powyższych celów pracy.

Szczegółowy program badań, ilustrowany blokowym schematem, zawarty jest w rozdziale 6. Doktorant opisał również przygotowanie próbek do badań oraz zaplanował i zaprezentował aparaturę badawczą zastosowaną podczas realizacji pracy. Podkreślić należy, że jako półfabrykat w procesie wytwarzania przyrostowego zastosowany został proszek stali 21NiCrMo2 o wymaganych parametrach morfologicznych polskiej produkcji wytworzony w Instytucie Metali Nieżelaznych – Sieć Badawcza Łukasiewicz.

Dalszy element pracy to rozdział 7 dotyczący opracowania procesu wytwarzania przyrostowego, w którym zawarto wyniki badań materiału wsadowego (półfabrykatu), dobór parametrów wytwarzania oparty o wyniki badań porowatości, badań strukturalnych, badań właściwości mechanicznych i analizę wstępnych wyników badań zmęczeniowych. Wpływ obróbki cieplno-chemicznej na właściwości stali 21NiCrMo2 Autor opisał w rozdziale 8.

Kompletny proces technologiczny wytwarzania kół zębatych z wykorzystaniem techniki SLM Doktorant szczegółowo opisał w rozdziale 9, poczynawszy od opracowania modelu CAD koła zębatego wykonanego na potrzeby wytwarzania przyrostowego a skończywszy na badaniach strukturalnych wykonanych części. Podsumowanie całości procesu technologicznego przedstawione zostało w oryginalny przejrzysty sposób w formie tabelarycznej zawierającej opis czynności, parametry i urządzenia oraz zastosowane metody i wartości parametrów zmierzonych lub zastosowanych w procesie.

Wyniki badań zmęczeniowej trwałości stykowej przedstawione zostały w rozdziale 10. Autor przeprowadził analizę wyników badań zarówno dla kół zębatych wykonanych konwencjonalnie jak i dla kół wytworzonych technologią przyrostową SLM, co ma duże znaczenie dla oceny przydatności technologii przyrostowej do warunków przemysłowych. Poznawcze znaczenie ma zaprezentowany mechanizm zużywania powierzchni bocznych zębów kół wykonanych techniką SLM.

Całość przeprowadzonych prac badawczych Doktorant podsumował w rozdziale 11 wymieniając między innymi w sposób e-numeratywny czternaście wniosków, osiem oryginalnych osiągnięć pracy i cztery kierunki przyszłych badań.

Cała praca pod względem formalnym i edycyjnym została napisana poprawnie. Podział treści jest prawidłowy. Rozprawa jest przejrzysta, napisana zrozumiale poprawnym technicznym polskim językiem.

3. Cele pracy

Technologie druku 3D znane w początkowej fazie swojego rozwoju, jako szybkie prototypowanie (*ang. Rapid Prototyping*), obecnie również technologie przyrostowe (*ang. Additive Manufacturing Technology*), znajdują coraz szersze zastosowanie w wielu obszarach techniki. Coraz częściej używa się ich nie tylko do wytwarzania modeli czy prototypów, ale również gotowych produktów lub półfabrykatów. Wśród czynników determinujących rozwój przyrostowych metod wytwarzania wymienić można:

- możliwość zaprojektowania i wytworzenia elementów o skomplikowanych kształtach, których nie można wykonać konwencjonalnymi technikami lub wykonanie konwencjonalnymi technikami jest bardzo trudne i możliwość zastąpienia kilku elementów jednym elementem,
- możliwość wytworzenia technologią przyrostową elementów w celu zastąpienia technologii konwencjonalnej.

Autor rozprawy doktorskiej formułując cele pracy wpisuje się we współczesne tendencje rozwojowe technologii druku 3D, co jest istotne ze względu na aspekty poznawcze jak i możliwości utylitarne otrzymanych wyników badań.

W technologiach przyrostowych materiał wytwarzanych modeli kształtowany jest „warstwa warstwie”, co ma istotny wpływ na jego właściwości mechaniczne. Problem ten zaczęto dostrzegać w produkcji modeli użytkowych, zwłaszcza tam, gdzie ze względu na działające obciążenia zewnętrzne brana jest pod uwagę wytrzymałość materiału. Zdecydowana większość publikacji dotyczących właściwości mechanicznych materiałów wytwarzanych technologiami druku 3D potwierdza występowanie anizotropowości ze względu na kierunek wydruku, czyli orientację modelu na platformie roboczej maszyny drukującej. W przypadku technologii SLM i takiego elementu jak koło zębate, które wytwarzane jest w orientacji, którą prezentuje w pracy Doktorant nie wydaje się być konieczne przeprowadzanie badań wpływu kierunków wydruku na właściwości mechaniczne materiału z którego zostało wykonane. Istotne są inne problemy badawcze, które ujęte zostały w zakresie badań przedstawionym bezpośrednio po sformułowanych celach. Ważniejsze z nich to:

- dobór parametrów wytwarzania elementów modelowych,
- analizy mikrostruktury, mikrotwardości i naprężeń własnych po wytworzeniu technologią SLM oraz po obróbce cieplno-chemicznej,
- badania trwałości zmęczeniowej.

Podkreślić należy, że Autor rozprawy konsekwentnie dąży do realizacji celów w swoich badaniach, których wyniki opisuje w kolejnych rozdziałach pracy.

4. Zastosowane metody badawcze, oprogramowanie i aparatura

Do wykonania próbek i modeli kół zębatach technologią SLM oraz realizacji badań objętych założonym programem zastosowano następujące metody badawcze i aparaturę:

1. Atomizer VIGA firmy ALD Vacuum Technologies GmbH (Hanau, Niemcy) – do wytworzenia proszku stali 21NiCrMo2, z którego wykonano próbki i koła zębate.
2. Oprogramowanie SolidWorks 2023 do zaprojektowania modeli i transformacji do formatu *.stl*.
3. Oprogramowanie CAM (Magics v.19) do tworzenia pliku wsadowego dla maszyny drukującej.
4. Maszyna drukująca SLM 125HL do wytworzenia przyrostowego technologią SLM badanych elementów.
5. Mikroskop skaningowy Jeol JSM-6610 z detektorem EDS do obserwacji materiału wsadowego i oszacowania składu chemicznego stali.
6. Mikroskop konfokalny Olympus LEXT OLS 4100 do obserwacji mikrostruktur.
7. Mikroskop KEYENCE VHX-7000 z modułem obrotowym obiektywu do badań struktury materiału, pomiarów porowatości i chropowatości oraz obserwacji powierzchni bocznych zębów.
8. Mikrotwardościomierz Struers DURA SCAN 70 do oceny twardości i grubości warstwy nawęglonej.
9. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8802 MT z ekstensometrem 25 i 50 mm do statycznej próby rozciągania i niskocyklowej trwałości zmęczeniowej.
10. System do cyfrowej korelacji obrazu DIC Dantec Q-400 wraz z oprogramowaniem ISTR 4D.
11. Piec Nabether P300 do procesu wyżarzania odprężającego.
12. Stanowisko do pomiarów naprężeń własnych metodą trepanacji otworowej z mostkiem tensometrycznym ESAM Traveler Plus typ 1032-S, urządzeniem RS-200 Milling Guide oraz oprogramowaniem do akwizycji i obróbki danych H-Drill.
13. Specjalistyczne stanowisko do badania wytrzymałości zmęczeniowej stykowej kół zębatach.
14. Waga AXiS ATA 520 do pomiaru zużycia masowego.
15. Analizator obrazu Morpholgi G3 do pomiaru rozkładu wielkości rozkładu cząstek i parametrów kształtu.
16. Oprogramowanie Statistica firmy TIBICO Software Inc. do usprawnienia procesu doboru parametrów technologicznych podczas obróbki wyników badań porowatości.
17. Maszyna współrzędnościowa Hexagon Dea Global Performance do pomiarów określenia klasy dokładności wykonanych kół zębatach.

5. Uwagi, wątpliwości, polemika, problemy wymagające wyjaśnienia.

Wszystkie spostrzeżenia, które nasunęły się podczas analizowania tekstu rozprawy doktorskiej, które budzą wątpliwości, wymagają wyjaśnienia lub są polemiką z Autorem pracy przedstawiono poniżej w formie e-numeracji.

1. Str. 94, czwarty wiersz od góry – można było zapisać parametry transformacji do formatu *.stl* tj. odchylenie i kąt. To ważne parametry, które decydują później o jakości wykonanego modelu, zwłaszcza takiego modelu jak koło zębate. W pracy badawczej dobrze byłoby również zamieścić

zrzut ekranu w formie graficznej (rysunek) przedstawiający siatkę trójkątów i wynik transformacji. Również w rozdziale 9 na stronie nie podano informacji o konkretnych parametrach transformacji do formatu *.stl*, stwierdzono, że były to najwyższe z możliwych. Przydałoby się wyjaśnienie tego problemu.

2. Str. 95, Rys. 6.4. – Przedstawiono schemat zorientowania próbek na platformie roboczej. W przypadku koła zębatego ustawienie na platformie jest optymalne i nie byłoby uzasadnione badanie tych modeli wytworzonych w innych orientacjach. W przypadku próbek do rozciągania wskazane byłoby jednak wykonanie modeli w orientacji Z, ze względu na anizotropię właściwości mechanicznych z uwagi na kierunek wydruku. Miałyby to znaczenie w późniejszym etapie pracy, gdy Autor porównuje wyniki statycznej próby rozciągania elementów wykonanych ze stali 21NiCrMo2 wytworzonej konwencjonalnie z elementami z tej samej stali ale otrzymanymi technologią przyrostową SLM.
3. Str. 109, cztery wiersze od góry – Autor przyjął dopuszczalny udział pustek w strukturze materiału przetwarzanego podczas badań porowatości na poziomie 0,3 % ustalając tą wartość jako kryterium doboru przydatności danej grupy parametrów technologicznych w procesie wytwarzania elementów ze stali 21NiCrMo2. Brak jest jednak wyjaśnienia dlaczego przyjęta została wartość 0,3 %.
4. Str. 131, 13 wiersz od dołu – numery wytypowanych grup próbek do badań nie zgadzają się z numerami grup próbek opisujących wyniki badań na rysunkach 7.19. i 7.20. Prawdopodobnie jest to pomyłka ale wymaga wyjaśnienia.
5. Str. 131, 11 wiersz od dołu – napisano, że dodatkowo badaniom poddano materiał wytworzony konwencjonalnie, ale nie podana została informacja ile próbek użyto do badań, z czego pobrano próbki i w jaki sposób je przygotowano do badań.
6. Str. 132, Rys. 7.19 – szkoda, że na rysunku pokazano tylko wybrane pojedyncze wykresy rozciągania. Można było pokazać wykresy rozciągania w poszczególnych seriach, co daje pełniejszy obraz wyników badań.
7. Str. 132, Tabela 7.12 – Tabela nie zawiera wyników standardowego odchylenia lub niepewności pomiarów w poszczególnych seriach. Nie wiadomo jakie były rozrzuty wyników, co przy braku pokazania wszystkich wykresów rozciągania czyni otrzymane wyniki trochę niejasne.
8. Str. 142, pierwszy wiersz pod rysunkiem 8.1 – nie napisano na czym polegała dodatkowa obróbka wykańczająca.
9. Str. 144 – Tytuł rozdziału mówi o pomiarze twardości materiału, natomiast w treści rozdziału w niektórych zdaniach pisze się o mikrotwardości a w innych o twardości. Ten kwestia wymaga wyjaśnienia.
10. Str. 151, Rys. 8.8 – podobnie jak w przypadku rysunku 7.19 nie przedstawiono wszystkich wykresów rozciągania w poszczególnych seriach. Szkoda, byłyby to cenne informacje badawcze.

11. Str. 151, Rys 8.9 – pokazano na rysunku wyniki statycznej próby rozciągania w postaci wykresów słupkowych ale z niepełnymi informacjami. Pokazano graficznie słupki błędów dla wytrzymałości na rozciąganie ale nie podano ich wartości, natomiast dla wydłużenia procentowego A [%] podano przy słupkach błędów ich wartości ale za to nie podano konkretnych wartości wydłużenia. Najlepiej oprócz rysunku zamieścić tabelę z wynikami, również z wynikami standardowego odchylenia, gdyż nie jest znany rozrzut wyników.

5. Uwagi szczegółowe

Wszystkie spostrzeżenia, które nasunęły się podczas analizowania tekstu rozprawy doktorskiej, dotyczące drobnych błędów np. literówek, błędów językowych, edycyjnych itp. Przedstawiono poniżej w formie e-numeratywnej.

1. Str. 6, niewłaściwie zredagowany tytuł rozdziału 8.5 „Badania statycznej próby rozciągania” – chodzi o badania z zastosowaniem próby rozciągania a nie o badania samej próby.
2. Str. 92, Rys. 6.1. – Blokowy schemat planu badań można było bardziej wyeksponować ze względu na jego wartość merytoryczną, np. powiększyć do formatu A4. W obecnej formie jest mało czytelny.
3. Str. 94. 6 wiersz od góry – literówka, powinno być napisane „wytwarzania”.
4. Str. 105, 12 wiersz od dołu – literówka, powinno być napisane „identyczne”.
5. Str. 116, drugi wiersz od góry (pod tabelą 7.5.) – „...zdecydowano o stworzeniu pełnego planu...”, lepiej napisać „...zdecydowano o opracowaniu pełnego planu...”.
6. Str. 120, pierwszy wiersz od góry (pod Rys. 7.8.) – „Wykorzystując oprogramowanie Statistica istnieje możliwość przedstawienia...”, poprawnie byłoby „Oprogramowanie Statistica umożliwia przedstawienie...”.
7. Str. 123, dwa wiersze od dołu – Napisano „Wyżarzanie odprężające prowadzone na próbkach przytwierdzonych do platformy ma za zadanie doprowadzenie do ich relaksacji”. Autorowi prawdopodobnie chodziło o relaksację naprężeń a nie o relaksację próbek.
8. Str. 124, 17 wiersz od dołu – „...zgłady były trawione Nitałem (roztwór 5%) stosując 10-cio sekundowy czas oddziaływania.”, lepiej napisać np. „...zgłady były trawione Nitałem (roztwór 5%) przez okres dziesięciu sekund.”
9. Str. 142, drugi wiersz nad rysunkiem 8.2. – „...dla próbek wytworzonych a materiału wytworzonego ...”, lepiej napisać np. „...dla próbek wykonanych z materiału wytworzonego...”
10. Str. 183, podpis pod osią X rysunku 10.3 – literówka, zamiast „Moment obciążając...” powinno być „Moment obciążający...”
11. Str. 214, podpis pod rysunkiem 10.32 – literówka, zamiast „wartość” powinno być „wartości”.
12. Str. 216, podpis pod rysunkiem 10.33 – literówka, zamiast „kolejny” powinno być „kolejnych”.
13. Str. 202, 8 wiersz od dołu – zamiast „stykowym” powinno być „stykowych”.

14. Str. 226, 2 wiersz od góry – zamiast „...podczas badań realizowanych na maszynach...” lepiej napisać „...podczas badań przy użyciu maszyn...”, lub np. „... do badań zastosowano maszyny...”
15. Str. 227, wniosek 4 – błędnie podano dwa razy tą samą wartość wytrzymałości na rozciąganie tj. $R_m=1042$ MPa.

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wpisuje się w aktualną problematykę wdrażania w przemyśle innowacyjnych technologii przyrostowych, które umożliwiają kształtowanie różnych elementów. Podczas procesów przyrostowych kształtowane są również materiały, z których są wykonywane elementy. Materiały te, a szczególnie ich właściwości, zwłaszcza właściwości mechaniczne są mało znane, dlatego przedstawione w tej rozprawie wyniki badań są istotne zarówno dla obszaru przemysłowego jak i dla szeroko rozumianego obszaru fazy b+r.

Mgr inż. Jakub Paweł Łuszczek realizując program swoich badań i opisując je w rozprawie doktorskiej wykazał swoją wiedzę i kompetencję w stosowaniu zaawansowanej aparatury badawczej oraz programów komputerowych, umiejętność stawiania celów poznawczego i utylitarnego oraz konsekwentną ich realizację. Opisane wyniki badań a zwłaszcza szczegółowo opisany proces technologiczny wytworzenia badanych kół zębatach oraz szczegółowo opisane wyniki badań zmęczeniowej trwałości zmęczeniowej mają istotne znaczenie poznawcze i są znaczącym krokiem w rozpoznaniu możliwości stosowania technologii przyrostowej SLM w warunkach przemysłowych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Pawła Łuszczka pt.: „Trwałość zmęczeniowa stykowa i mechanizm uszkodzeń kół zębatach ze stali 21NiCrMo2 wytworzonych techniką przyrostową SLM” spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z późniejszymi zmianami, Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wartość poznawczą przeprowadzonych badań, opracowanie metody doboru parametrów technologicznych wytwarzania przyrostowego SLM elementów ze stali 21NiCrMo2, szczegółowy opis wyników badań trwałości zmęczeniowej wraz opisem mechanizmów zniszczenia, wprowadzenie w swojej pracy zaawansowanych metod badawczych i aparatury badawczej wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.

Kielce dn. 03 października 2024 r.

dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk